

# 2

## Accidentes y sistemas de seguridad en túneles

*Enrique Alarcón Álvarez*

1. Introducción
2. La producción y el movimiento de los humos
3. Ensayos en modelo reducido
4. Pruebas en túneles de ensayo
5. Ensayos en túneles abandonados
6. Sistemas de seguridad en túneles



Enrique Alarcón Álvarez.  
Profesor Dr. Ingeniero de Caminos, Canales y Puertos.  
Académico de la de Ingeniería.

# Accidentes y sistemas de seguridad en túneles

**E**n esta presentación se pretende una transición entre los conceptos fundamentales introducidos en el capítulo anterior y los que serán descritos posteriormente en las realizaciones recientes que van a ser presentadas. En primer lugar se harán unos breves comentarios sobre los accidentes en túneles de carretera que han servido para llamar la atención de la profesión sobre las incógnitas subyacentes en un problema que se creía bien resuelto. A continuación se describirá el proceso que ha ido elaborando el conocimiento actual mediante analogía con otras aplicaciones y ensayos específicos, lo que permitirá comentar el origen de algunas recomendaciones prácticas que se manejan actualmente. Finalmente se hará un resumen de los sistemas de seguridad activos y pasivos de uso habitual en los túneles que servirá de introducción a los siguientes capítulos.

## 2.1. Introducción

Los últimos años han sido pródigos en accidentes con fuego en túneles de tráfico, lo que ha motivado la preocupación de los organismos encargados de velar por la seguridad en el transporte así como de los usuarios en general. Ello ha dado lugar a un renovado interés por todos los aspectos relacionados con la seguridad de lo que son buena prueba las Recomendaciones del Grupo de Expertos de las Naciones Unidas sobre la seguridad en túneles carreteros, y la realización de este mismo Seminario.

Como toda obra pública los túneles son infraestructuras esencialmente seguras en donde los accidentes graves son sucesos raros que, al ser inesperados y afectar a un número alto de usuarios, despiertan alarma social.



Figuras 1 y 2.

En el caso particular de incendios en túneles, el catálogo llevado a cabo en los de carreteras muestra que se trata de accidentes generalmente sin víctimas que suelen ser controlados por los servicios de explotación, cuando no por los propios viajeros afectados. La referencia 1 muestra que en la segunda mitad del siglo xx y hasta el año 1999 se habían producido en todo el mundo unos 50 muertos por incendio en aquellas circunstancias.

Sin embargo, en un solo año (1999) se duplicó esa cifra con los incendios en Mont Blanc (Figura 1) y Tauern y en 2001 se llegó casi a la veintena de muertos con los de San Gotardo y Gleinalm. Si se incluyen los accidentes en el funicular de Kaprun del año 2000 (155 muertos) y el incendio en el túnel ferroviario bajo el canal de la Mancha en 1996 se materializa el panorama de alarma general ante el aumento de la frecuencia de las catástrofes.

En la referencia 1 se incluyen algunos comentarios sobre enseñanzas adquiridas en el estudio de estos accidentes cuyas causas pueden achacarse a factores que van desde el proyecto a la explotación pasando por comportamiento de usuarios y vehículos.

Tanto Mont Blanc como Tauern son túneles de doble sentido con altas intensidades de circulación de vehículos pesados.

La Figura 2 muestra la situación desde detrás del camión que provocó el accidente de San Gotardo al salirse de su carril e invadir el de sentido contrario impactando con otro camión que quedó atravesado y es el que se observa en llamas a la derecha de la imagen.

Por oposición al sistema de refugios presurizados sin salida en Mont Blanc, el túnel de San Gotardo disponía de vías de evacuación que permitieron el escape de los usuarios que reaccionaron a tiempo. Desgraciadamente existe un sentimiento de resistencia al abandono de los propios vehículos donde, equivocadamente, se supone una mayor seguridad de acción frente a los humos, que hizo que los muertos perecieran asfixiados en aquéllos o perdidos ante la falta de visibilidad antes de llegar a las puertas de los refugios.

El control de los humos es así uno de los temas más importantes que, desde el punto de vista del salvamento y evacuación, deben ser analizados por los responsables de la explotación.

## 2.2. La producción y el movimiento de los humos

Según se ha indicado en el capítulo anterior la combustión es una reacción exotérmica de oxidación de los compuestos orgánicos que, en condiciones estequiométricas, produce anhídrido carbónico y vapor de agua. Estas condiciones ideales pueden conseguirse mediante una mezcla adecuada (llamas premezcladas) pero los fuegos naturales corresponden a una situación en que la mezcla es debi-

da a las condiciones de boyancia y turbulencia de los volátiles producidos que se mezclan con aire que se va incorporando a diferentes alturas del penacho provocando productos de combustión incompleta como el monóxido de carbono o las partículas de carbonilla.

En estas llamas de difusión la producción de humo es debida en un porcentaje mayoritario a la incorporación de aire arrastrado por el penacho del fuego. Por eso la National Fire Protection Association (NFPA) define el humo como “el aire conteniendo las partículas sólidas y líquidas y los gases resultado de la pirólisis o combustión de un material, junto con la cantidad de aire que haya sido arrastrado o mezclado por cualquier procedimiento en la masa” (1993).

La Figura 3 muestra esta situación del penacho arrastrando aire vecino así como la interferencia con un viento lateral provocado por la ventilación natural o artificial y con una superficie de cierre del espacio superior que impide el desarrollo vertical de la llama y el penacho y provoca la formación de un estrato de humo con el techo que se extiende en horizontal hasta que se enfría y se mezcla con la capa de aire limpio.

Precisamente, la presencia de este estrato (que fue utilizada por los usuarios y los bomberos en el famoso incendio del túnel Holland en N. York 1949), está en la base de la filosofía de actuación para el salvamento de las personas.

En la figura se bosqueja también el retroceso aguas arriba de la capa de humos (a veces llamado *recirculación*) que intenta ser evitado en los túneles de un solo sentido de circulación mediante aumento de la velocidad de soplado.

Uno de los primeros intentos de cuantificación de fenómenos es debido a Heselden (1976) que aplicó a túneles resultados de estudios llevados a cabo para edificación obtenidos mediante experimentos sobre llamas en laboratorio.

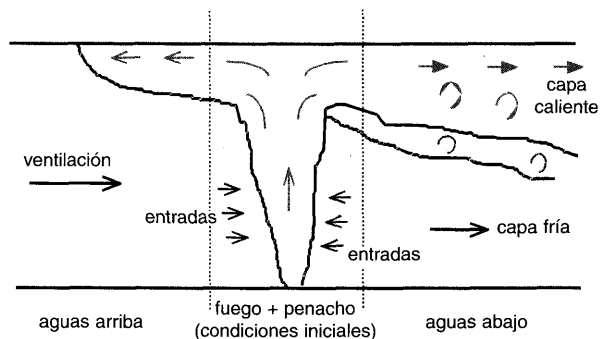


Figura 3.

La Figura 4.a muestra los tres regímenes de una llama (ref. 3): el campo próximo o zona donde existe una llama persistente y un flujo acelerado de gases, una región intermedia donde la llama es intermitente y donde la velocidad de flujo es casi constante y finalmente el penacho formado por boyancia que se caracteriza por una temperatura y velocidad decreciente con la altura.

En la Figura 4.b se colocan los resultados de Mc. Caffrey dibujados como relación  $V/\dot{Q}^{1/5}$  y  $z/\dot{Q}^{2/5}$  donde  $\dot{Q}$  es la potencia del fuego en kW.

Para la temperatura en el centro de la llama se han propuesto diferentes expresiones entre las que cabe citar la de Beyler (ref. 4):

$$\Delta T_0 = 22 \frac{\dot{Q}^{2/3}}{z^{5/3}} \quad (1)$$

donde a veces se recomienda medir  $z$  desde un origen virtual que según Heskestad (ref. 5) responde a una expresión del tipo:

$$\frac{T_0}{D} = -1,02 + 0,083 \frac{\dot{Q}^{2/5}}{D} \quad (\dot{Q} \text{ en kW}) \quad (2)$$

donde  $D$  es el diámetro del fuego (que, a veces, se obtiene de su perímetro).

Para fuegos inferiores a 20 MW una relación sencilla entre potencia y perímetro es:

$$\varphi \text{ (m)} \approx 5,5 \sqrt{\dot{Q} \text{ (MW)}} \quad (3)$$

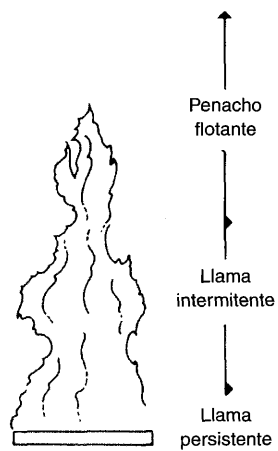
Así, un incendio de 5 MW correspondería a un perímetro de unos 12,5 m.

Para la longitud de la llama se acepta:

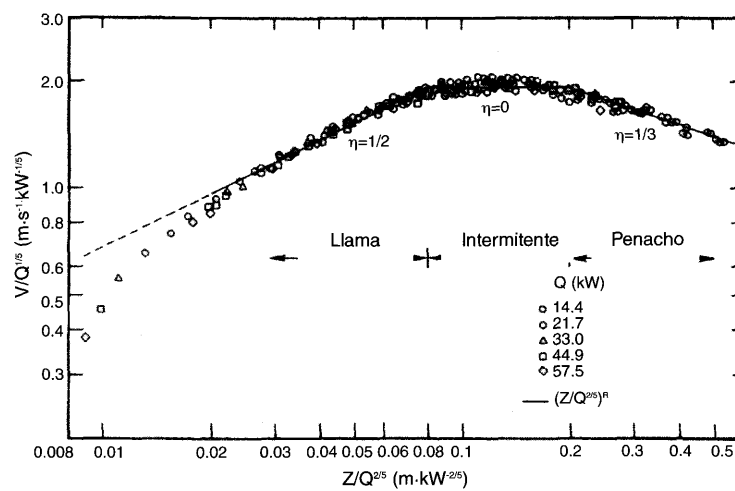
$$l = 0,23 \dot{Q}^{2/5} - 1,02 D \quad (\dot{Q} \text{ kW}) \quad (4)$$

En el incendio de 5 MW el diámetro equivalente sería:

$$D = \frac{\varphi}{\pi} \sim \frac{12,3}{\pi} \approx 3,9 \text{ m}$$

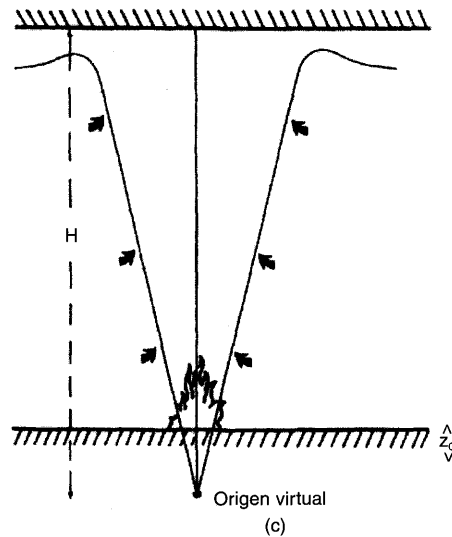


a)



b)

Figura 4.



(c)

Figura 5.

y por tanto

$$l = 0,23 (5.000)^{2/5} - 1,02 \cdot 3,9 = 2,96 \text{ m}$$

Puede verse que potencias superiores darían lugar a llamas que, en algunos casos, estarían cerca de los falsos techos de los túneles. Por ejemplo, en el incendio de un camión de 30 MW con un perímetro de fuego de unos 30 m se llegaría a una altura de casi 4,50 m.

Respecto a la producción másica de humos existen diversas fórmulas que asumen directamente su correspondencia con el aire arrastrado por el penacho hasta la base del estrato de humo caliente. Hasta 30 MW se pueden usar fórmulas como la de Thomas (1963) (Figura 6) que suponen que el aire arrastrado por el penacho es proporcional a su superficie lateral y  $T_0$  y  $T_f$  son la temperatura ambiente y la de los gases del penacho, respectivamente.

$$\dot{m} = 0,096 \varnothing \rho_0 y^{3/2} \left( \frac{g T_0}{T_f} \right)^{1/2} \text{ kg/s} \quad (5)$$

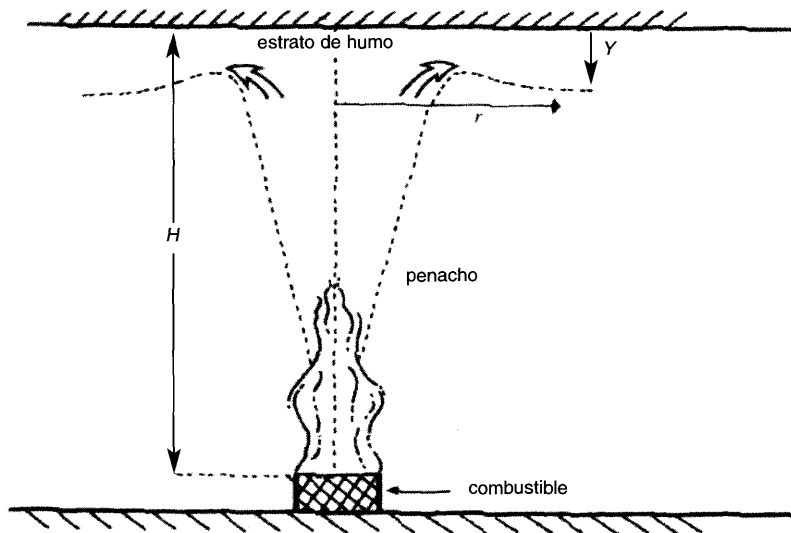


Figura 6.



Si se admite  $T_0 = 290 \text{ K}$ ;  $T_f = 1.100 \text{ K}$  y  $\rho_0 = 1,22$  la ecuación (5) puede reducirse a:

$$\dot{m} = 0,188 \, y^{3/2} \text{ kg/s} \quad (6)$$

o, usando la fórmula (3) en primera aproximación

$$\dot{m} = Q^{1/2} y^{3/2} (\dot{Q} \text{ en MW}) \quad (7)$$

Por ejemplo, si se toma  $\dot{Q} = 30 \text{ MW}$ ;  $y = 3 \text{ m}$  se tendría  $\dot{m} = 28,4 \text{ kg/s}$

Para obtener el volumen de gases a extraer sería preciso estimar una temperatura media. Generalmente para fuegos de menos de 30 MW se suponen unas pérdidas por radiación del 30% y por ello se puede estimar la temperatura media de los gases bajo el falso techo en la forma:

$$\theta = 0,70 \frac{\dot{Q}}{C_p \dot{m}} \text{ (}^\circ\text{C)} (\dot{Q} \text{ en vatios)} \quad (8)$$

Más reciente (1986) que la fórmula (5) es la de Heskestad

$$\dot{m} = 0,076 \, \dot{Q}^{1/3} z^{5/3} \quad (9)$$

donde  $z$  es la altura respecto a la fuente virtual.

Estas fórmulas son insatisfactorias tan pronto como la altura de llama alcanza el techo, pues sólo puede producirse una parte de la combustión en el penacho vertical y el resto debe llevarse a cabo en el estrato horizontal lo que implica la existencia de llamas bajo el techo que se pueden extender a decenas de metros.

Una alternativa propuesta por Heselden consiste en suponer que el aire arrastrado es tal que daría una temperatura de  $1.000 \text{ }^\circ\text{C}$ ; suponiendo una pérdida del 5% como radiación se tendría así:

$$\dot{m} = \frac{0,95 \, Q}{C_p \, 1.000}$$

es decir, 95 kg/s para un fuego de 100 MW.

Las temperaturas suelen estimarse mediante la fórmula de Alpert (1972) que relaciona la temperatura máxima del estrato de humos  $T_{\text{máx.}}$  con la temperatura ambiente  $T_0$  en función de la altura mediante la expresión:

$$T_{\text{máx.}} - T_0 = \frac{5,58 (\dot{Q}/r)^{2/3}}{H} \quad \text{si } r > 0,18 H$$

$$T_{\text{máx.}} - T_0 = 16,9 \frac{\dot{Q}}{H^{5/3}} \quad \text{si } r \leq 0,18 H$$

(10)

donde  $H$  es la altura del techo y  $\dot{Q}$  está en kW.

La forma de las curvas puede verse en la Figura 7 para un techo de diferentes alturas y un potencia de 20 MW (Alpert 1972).

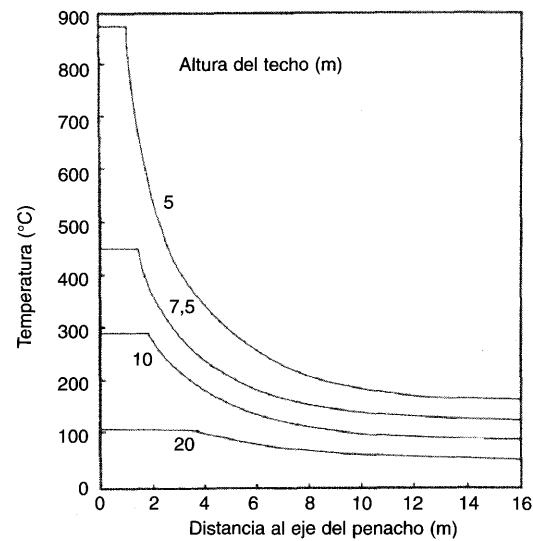


Figura 7.

La velocidad horizontal de la capa de humos se obtiene de:

$$u_{\text{máx.}} = \frac{0,197 \dot{Q}^{1/3} H^{1/2}}{r^{5/6}} \text{ m/s} \quad (11)$$

Si por ejemplo se escoge un túnel de 5 m de altura libre y 10 m de anchura, la velocidad a una distancia de 5 m sería, para un incendio de 20 MW

$$u_{\text{máx.}} = \frac{0,197 \cdot (20.000)^{1/3} 5^{1/2}}{5^{5/6}} = 3,1 \text{ m/s}$$

Conociendo esta velocidad inicial, la producción másica y la temperatura se puede estimar el espesor inicial de la capa de humos:

$$d = \frac{1}{2} \frac{\dot{m}}{\rho u_{\text{máx.}} B} \quad (12)$$

donde B es la anchura.

Si se supone inicialmente en el ejemplo anterior que  $y = 4$  m (es decir  $d = 1$  m) las fórmulas (7) y (8) dan respectivamente  $\dot{m} = 35,8$  kg/s y  $\theta = 391^\circ\text{C}$  y es decir  $r = 0,533$ .

De esta forma

$$d = \frac{1}{2} \frac{35,8}{0,533 \cdot 3,1 \cdot 10} \approx 1,1 \text{ m}$$

En el caso del incendio de 100 MW se obtiene:

$$u_{\text{máx.}} = 3,1 \cdot 5^{1/3} = 5,3 \text{ m/s}$$

y

$$d = \frac{1}{2} \frac{95}{0,354 \cdot 5,3 \cdot 10} = 2,5 \text{ m}$$

Respecto a la máxima velocidad de ascensión en el penacho, de interés para el proyecto de rociadores, Mc Caffrey indica:

$$V_{0 \text{ (máx.)}} = 1,9 \dot{Q}^{1/5} \text{ m/s} \quad (13)$$

Como se ha dicho anteriormente, la importancia del humo radica en su capacidad de intoxicación pero también en la opacidad que genera en el ambiente y que contribuye a la desorientación de los usuarios en plena evacuación.

La reducción de la intensidad luminosa en un rayo que atraviesa una nube de humo se modela mediante la ley de Lambert:

$$I = I_0 e^{-kcl} \quad (14)$$

donde:

- k es una constante que depende de la fuente de humos.
- c es la concentración másica de las partículas de humo.
- L es la longitud atravesada por el rayo de luz.

Para obtener una magnitud proporcional a la concentración se define la densidad óptica D mediante:

$$D = - \frac{1}{L} \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) = 0,434 kc \text{ (m}^{-1}\text{)} \quad (15)$$

o bien

$$D^* = - \frac{10}{L} \lg \left( \frac{I}{I_0} \right) \text{ (dB m}^{-1}\text{ = obscura = ob)} \quad (16)$$

donde el factor 10 se ha introducido para conseguir una medida en decibelios que en la literatura anglosajona se denomina *obscura* (ob).

Rabash demuestra que existe una buena correlación entre la obscura y la visibilidad V (Figura 8) que corresponde aproximadamente a la ley:

$$D^* \cdot V = 10 \text{ (D} \cdot V = 1\text{)}$$

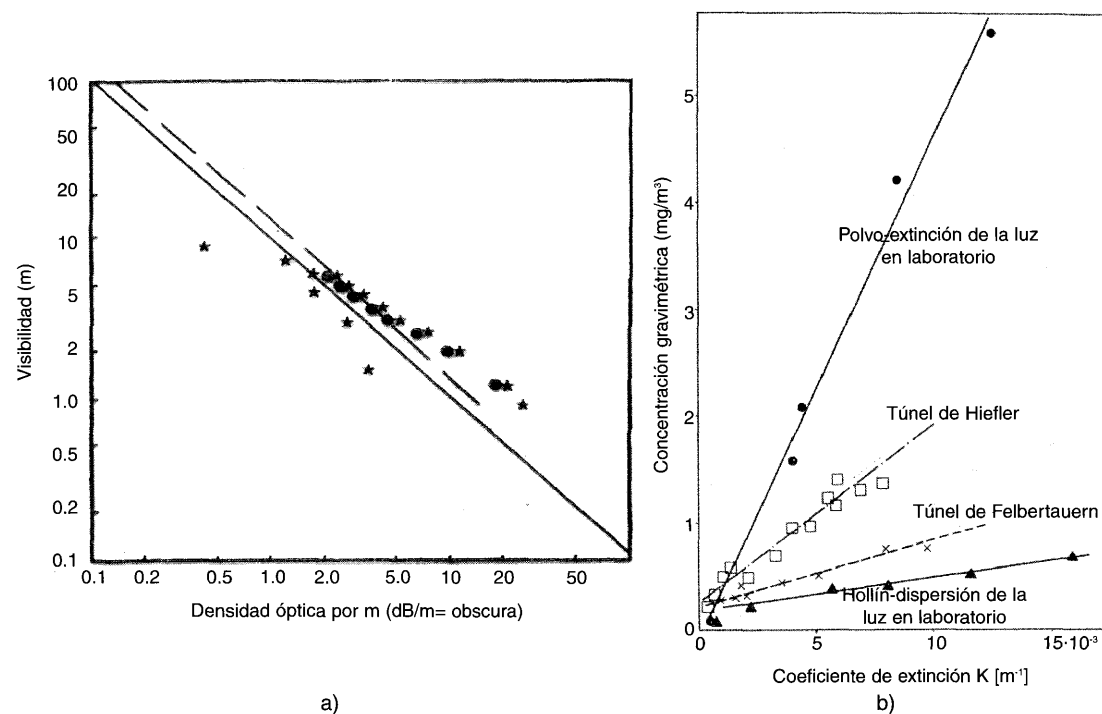


Figura 8.

para señales iluminadas frontalmente y a

$$D^* \cdot V = 25 \quad (D \cdot V = 2,5)$$

para señales iluminadas desde su trasdós.

Así una densidad óptica  $D^* = 10$  ob corresponde a una visibilidad  $V = 1$  m

En laboratorio se ha introducido un ensayo consistente en medir el humo generado en condiciones controladas por un material contenido en una cámara de densidad de humos (ANSI/ASTM E662-79) donde la densidad óptica típica  $D_0$  se define como:

$$D_0 = D^* \frac{\text{Vol}}{M} \quad (\text{db m}^{-1} \text{ m}^3 \text{ g}^{-1})$$

siendo M la masa medida en gramos que se ha quemado durante el ensayo.

Existe una discusión abierta, en situación de servicio, respecto a la importancia de las emisiones de los vehículos formadas por pequeñas partículas de hollín que provocan la dispersión de la luz frente a las partículas mayores de polvo de diferente origen (neumáticos, pavimentos, etc.) que cada vez van a tener mayor peso en el total al reducirse las emisiones. La Figura 8b muestra la concentración medida en diferentes túneles austriacos frente al efecto de polvo y hollín que se miden en laboratorio.

Las fórmulas anteriores corresponden a situaciones en las que el aire se encuentra en reposo. En el caso de los túneles el tiro longitudinal natural o forzado influye de forma decisiva en el comportamiento del humo. En los apartados siguientes se describen algunos ensayos que han contribuido al conocimiento que se aplica actualmente.

## 2.3. Ensayos en modelo reducido

Entre los ensayos en modelo físico que han tenido más repercusión en las aplicaciones prácticas se encuentran los descritos por Chassé y Lacroix (1994).

El objetivo consistía en el análisis de diferentes formas y colocaciones de exutorios para la evacuación de humos contenidos en una capa estratificada. Esta última se modelaba mediante una mezcla de helio y nitrógeno flotando sobre aire, lo que permite mantener el número de Froude, con g constante aunque se falsea el número de Reynolds. La escala del modelo (Figura 9) es 1:15 y en el caso de la figura corresponde a un tubo de 17 m de longitud equivalentes a 225 m, donde se observan los ventiladores de 4 exutorios situados cada 50 m, así como diferentes boquillas situadas al tresbolillo representando un sistema de ventilación semitransversal típico.

La Figura 10 es una imagen correspondiente a uno de los 30 ensayos de estratificación que se llevaron a cabo y que se completaron con otros 130 de extracción en los que los exutorios se variaban de forma, tamaño y posición.

Los resultados más interesantes de la prueba indicaron que:

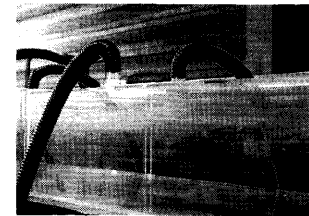
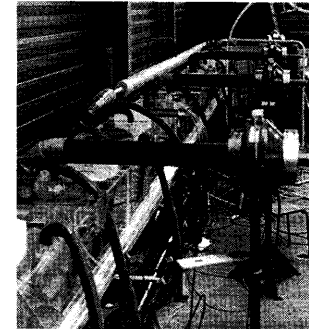
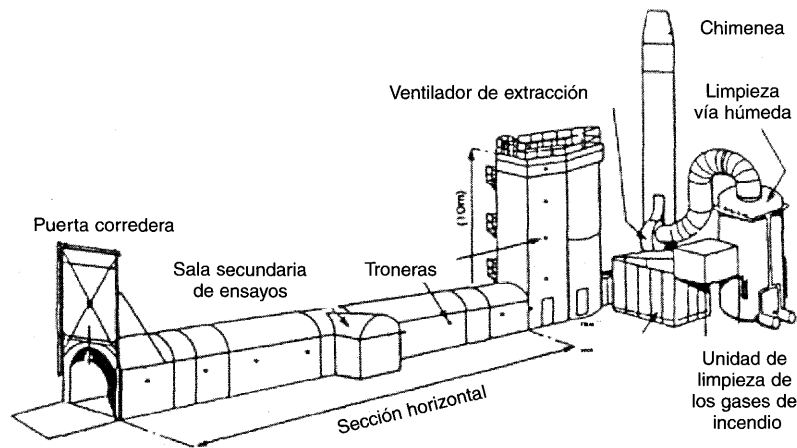
- Entre 5 m/s y 20 m/s la velocidad de aspiración no influye en la efectividad.
- A igualdad de área la forma del exutorio es irrelevante.
- Los exutorios cenitales son más efectivos que los situados en hastiales.

- d) La distancia óptima se encuentra entre 50 y 100 m.
- e) La efectividad pasa por un máximo si el caudal total aspirado es 4/3 del emitido.

Esta última conclusión está en la base de los criterios de extracción de humos que se manejan en la práctica actual. Por ejemplo los  $60 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  que habitualmente se adjudican a los humos emitidos por los incendios de un autobús (20 MW) o una camioneta (30 MW), se transforman respectivamente en  $80 \text{ m}^3/\text{s}$  y  $110 \text{ m}^3/\text{s}$  de caudal que debe espirarse a aplicarle la regla de los 4/3.

## 2.4. Pruebas en túneles de ensayo

Se han llevado a cabo experimentos en túneles de tamaño reducido como el de INERIS contenido en la Figura 11 (Ref. 14).



Figuras 9 y 10.

Figura 11.

Las dimensiones no son suficientes para reproducir los fenómenos a escala real pero sin embargo son útiles para ensayar dispositivos que, como las sartenes de heptano, pueden ser usados en la simulación controlada de fuegos en túneles de experimentación o en servicio, como se indicará más abajo.

En este caso se ha visto que los diámetros a utilizar deben ser superiores al metro para conseguir que las llamas sean totalmente turbulentas. La velocidad másica de quemado ( $\text{kg/m}^2\cdot\text{s}$ ) se puede obtener mediante expresiones del tipo:

$$\dot{m} = \dot{m}_0 (1 - e^{-k\beta d}) \quad (17)$$

Para el caso del heptano, Babrauskas propone:

$$\dot{m}_0 = 0,101 \text{ kg/m}^2 \cdot \text{s}$$

$$k\beta = 1,1 \text{ m}^{-1}$$

con lo que se obtiene para una sartén de 1,2 m de diámetro, un consumo de 74 g/s que con un calor de combustión de 44,56 MJ/kg y un rendimiento de la combustión de 0,95 produce una potencia de 3 MW.

El esquema del sistema de ensayo puede verse en la Figura 12 donde se observa que mediante termopares, transductores, válvulas y un lazo de control se consigue mantener el nivel de heptano y controlar el fuego a distancia suficiente para que los operadores se encuentren protegidos.

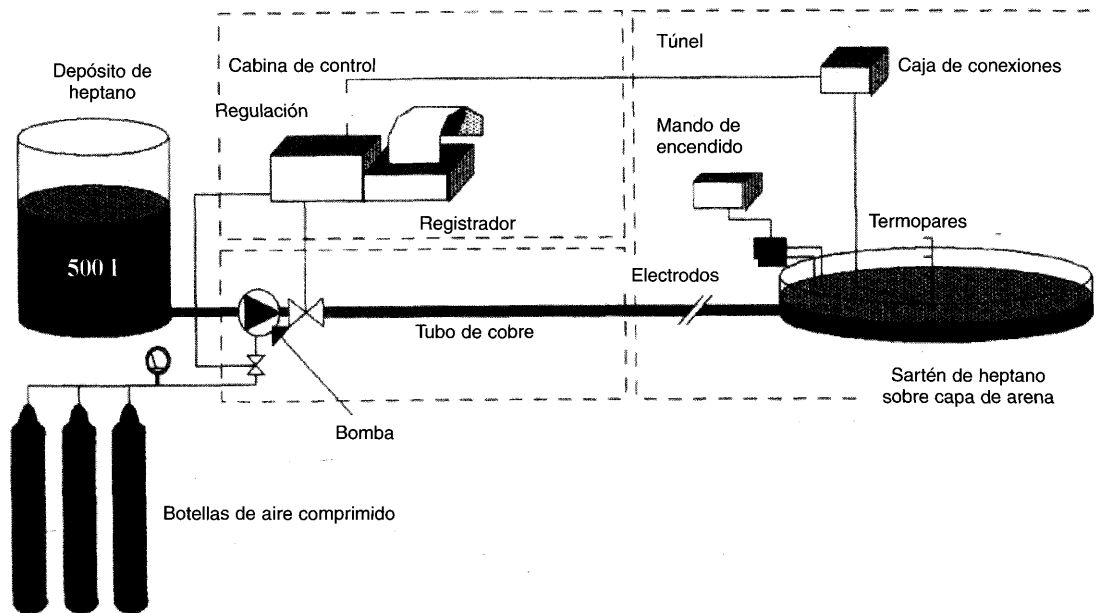


Figura 12.



## 2.5. Ensayos en túneles abandonados

Con objeto de estudiar criterios de ventilación, manejo de humos, etc., se han llevado a cabo experimentos en túneles abandonados entre los que cabe citar los del Memorial Tunnel en EE.UU. y Repparfjord en Noruega.

### 2.5.1. Los ensayos en el Memorial Tunnel

La construcción en 1987 de una variante de carretera dejó abandonado un túnel de 853 m y 3,2% de pendiente construido en 1953 en la West Virginia Turnpike, cerca de Charleston (West Virginia).

La sección original puede verse en la Fig. 13. donde se observa que el conducto de ventilación está dividido en dos cantones mediante un muro que iba variando linealmente entre los dos extremos

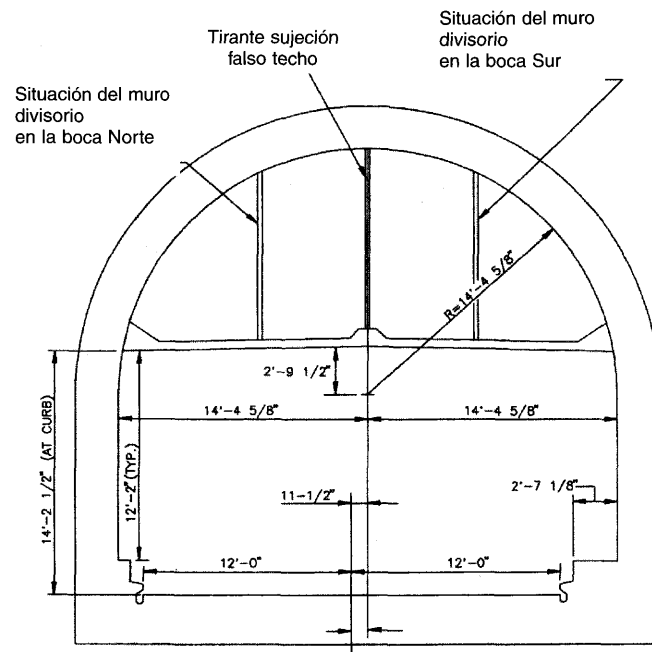


Figura 13.

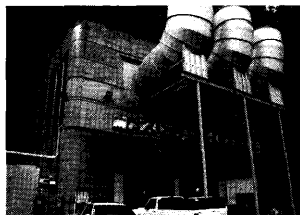


Figura 15.

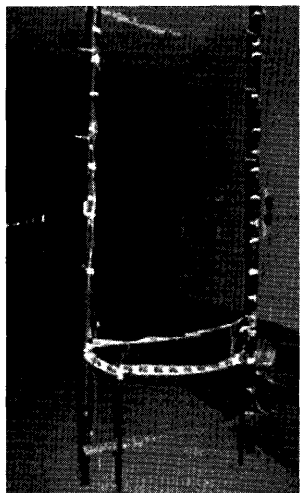


Figura 16.

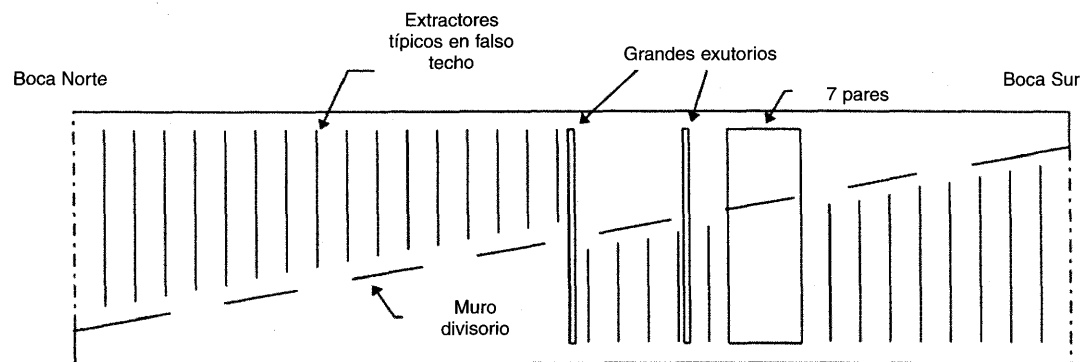


Figura 14.

La sección transversal es de  $60,4 \text{ m}^2$  de los que  $36,2 \text{ m}^2$  corresponden a la zona de circulación. El sistema de ventilación original era transversal con un ventilador de soplado en la boca sur y de aspiración en la norte. El tabique central creaba una cámara de aspiración de ancho variable creciente desde sur a norte.

En el nuevo túnel se colocaron 6 ventiladores reversibles tres en cada boca (Figura 15) de 224 kW capaces de suministrar  $94,4 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $1.294 \text{ Pa}$  y de resistir  $316^\circ\text{C}$  de temperatura.

Con ellos se llevaron a cabo los ensayos para simular sistemas de ventilación transversales puros y con exutorios.

Tras retirar el falso techo también se colocaron ventiladores de chorro agrupados en 8 series de 3 ventiladores, cada uno de 56 kW,  $43 \text{ m}^3/\text{s}$  y capaces de resistir  $300^\circ\text{C}$ .

Se colocaron 4 sartenes de acero a 238 m de la boca sur (donde se quemaba gasolina o gasóleo) con las que se simulaban potencias de fuego de 10 a 100 MW jugando con diámetros equivalentes a 10, 20, 30 y 50 MW (se estimó que una superficie de  $4,5 \text{ m}^2$  era capaz de generar 10 MW).

La Figura 16 muestra algunos árboles de medida colocados bajo y sobre el falso techo y encargados de medir el monóxido de carbono, la temperatura, la velocidad, etc.

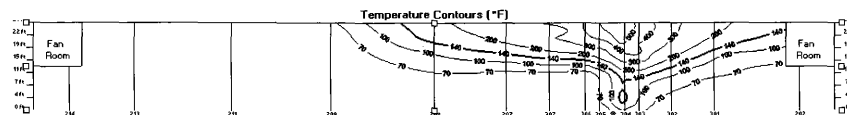
En la ref. 13 pueden estudiarse los detalles de los numerosos ensayos entre los que como muestra se han entresacado los siguientes.

La Figura 17 muestra las isolíneas de temperatura correspondientes a un ensayo con ventilación natural y una potencia de alrededor de 12 MW. En los primeros instantes se observa una distribución simétrica respecto al foco que se transforma al cabo de 4 minutos en un arrastre por el tiro natural.

Es interesante observar la localización de la isoterma de  $140^\circ\text{F}$  ( $60^\circ\text{C}$ ) que puede utilizarse para marcar la zona de altas temperaturas y ver su extensión con el paso del tiempo.

**TEST 501** **MEMORIAL TUNNEL FIRE VENTILATION TEST PROGRAM**  
**Point-In-Time Graphic: 1 minutes 58 seconds elapsed time**

Heat Release Rate Actual: 13,7 MW



**TEST 501** **MEMORIAL TUNNEL FIRE VENTILATION TEST PROGRAM**  
**Point-In-Time Graphic: 4 minutes 58 seconds elapsed time**

Heat Release Rate Actual: 11,6 MW

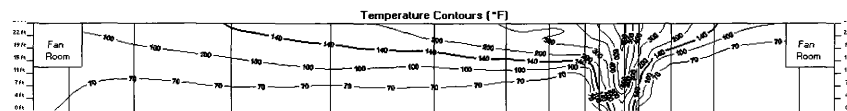


Figura 17.

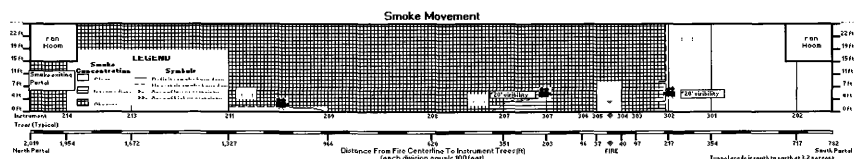
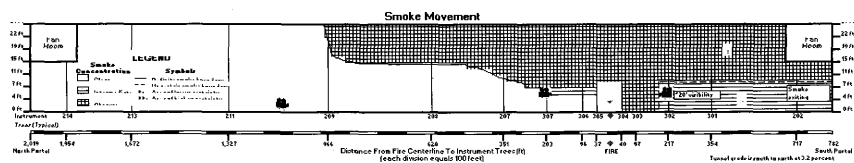


Figura 18.

Por su parte la Figura 18 representa el movimiento del humo en el mismo ensayo.

Entre las zonas limpia y oscuras se observa otra con rayado horizontal en que la visibilidad era del orden de 6 m, zona que al principio alcanza una altura de 2 m aguas arriba del fuego. Tan sólo 5 minutos después aguas abajo desaparecen las zonas con algo de visibilidad.

En la Figura 19 se muestran resultados semejantes para un ensayo de efectos de la actuación de aceleradores sobre la estratificación de humos.

Puede verse de nuevo la inclinación de la línea de los 60° aguas abajo así como el llenado completo del túnel por un humo que anula la visibilidad salvo en una pequeña zona de 180 m de longitud y una altura de 1,5 m.

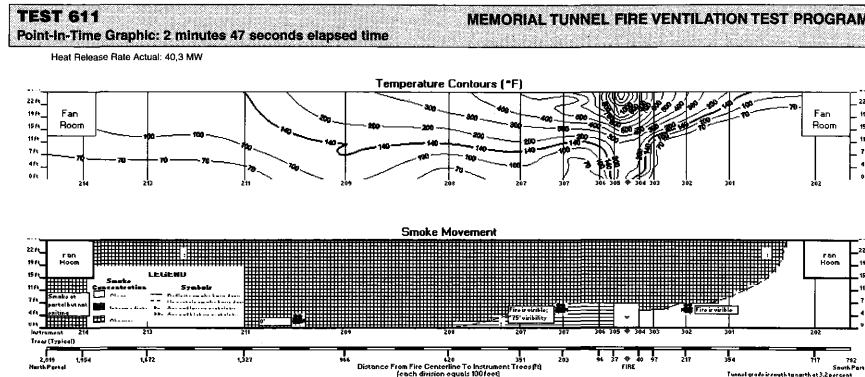


Figura 19.

Además de la creación de una base de datos que puede servir para contrastar modelos numéricos, uno de los resultados mas interesantes de los ensayos de ventilación longitudinal ha sido el establecimiento de la velocidad crítica con que debe hacerse circular el aire para evitar que se produzca el retroceso de la capa de humos.

La fórmula a la que se ha llegado es:

$$V_c = K_1 K_g \left( \frac{gH\dot{Q}}{\rho C_p AT} \right)^{1/3}$$

$$K_1 = Fr_c^{-1/3}$$

$$K_g = 1 + 0,0374 m^{0/8}$$

$$T = \frac{Q}{\rho C_p AT} + T_0$$

donde:

- $V_c$  es la velocidad crítica del aire longitudinal (m/s)
- $g$  aceleración de la gravedad ( $m/s^2$ )
- $H$  la distancia entre la base del fuego y el punto más alto del techo (m)
- $\dot{Q}$  la potencia del incendio (W)

$\rho$  densidad del aire longitudinal ( $\text{kg/m}^3$ )  
 $C_p$  calor específico del aire ( $1.005 \text{ J/kg} \cdot \text{K}$ )  
 $A$  sección transversal del túnel ( $\text{m}^2$ )  
 $m$  valor absoluto de la pendiente del túnel en porcentaje  
 $T$  temperatura media de los gases  
 $T_0$  temperatura del aire longitudinal  
 $Fr_c$  valor crítico del número de Froude ( $\sim 4,5$ )

La Figura 20 muestra los resultados obtenidos en los ensayos y el buen ajuste de la fórmula propuesta.

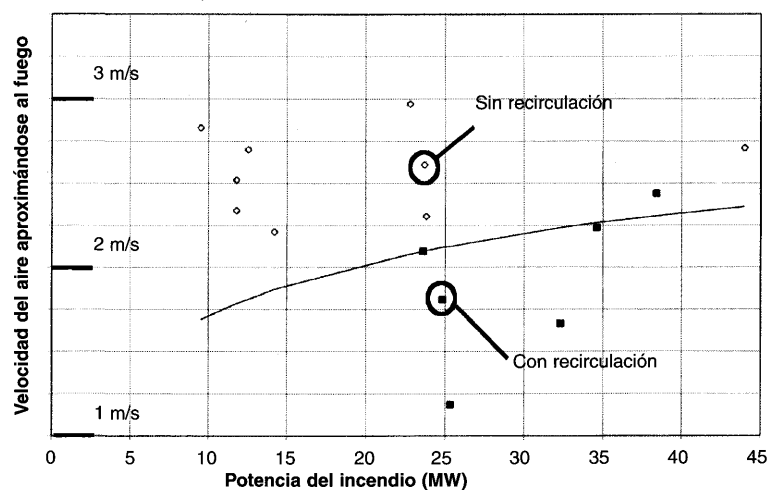


Figura 20.

### 2.5.2. Los ensayos en el túnel del Repparfjord

Estos ensayos llevados a cabo (en el marco de un proyecto EUREKA con participación de numerosos países europeos) entre 1990 y 1992 abarcaron vehículos de transporte ferroviario y por carretera así como modelos con heptano, madera, etc.

El túnel es una antigua explotación minera de cobre con una longitud de 2,3 km y un ramal de 365 m que fue cerrado durante los ensayos. Está localizado en Hammerfest (Noruega) cerca del cabo Norte. La Figura 21 muestra la planta y la irregular sección entre 5,3 y 7 m de anchura y 4,8 y 5,50 m de altura. Está excavado en roca, con una rugosidad muy notable, y debió ser protegido con sostenimiento

de hormigón proyectado en las zonas con fuego concentrado localizadas entre los puntos 260 y 345 m desde la boca.

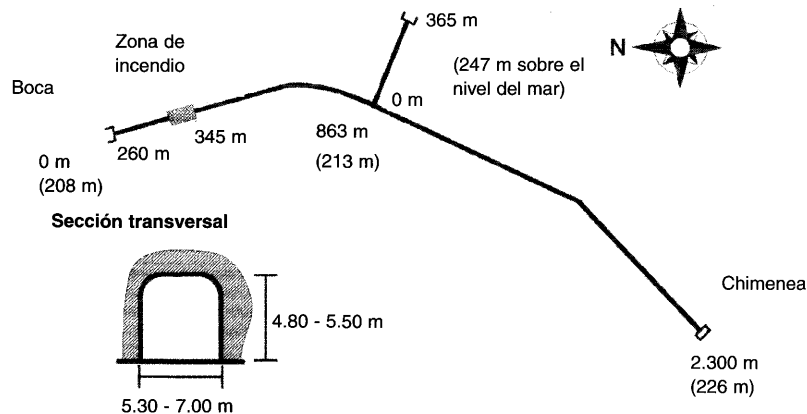


Figura 21.

La instrumentación, variada y completa, está descrita en la referencia 14 y la Figura 22 muestra las secciones donde se llevan a cabo medidas.

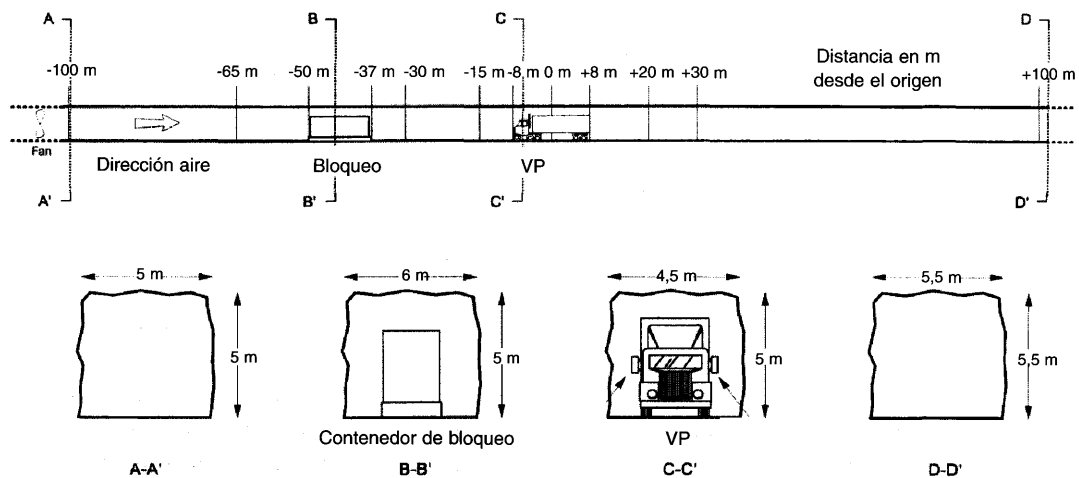


Figura 22.

Entre los resultados más interesantes se encuentran los relativos al desarrollo de las temperaturas, la opacidad y la emisión de CO y en particular los estudios comparativos entre los distintos vehículos. Así la Figura 23 muestra la evolución de las temperaturas a 2 m de altura debidas a un coche Metro de aluminio, (41.000 MJ), a un coche de ferrocarril con estructura de acero (77.000 MJ) y a un autobús (48.000 MJ).

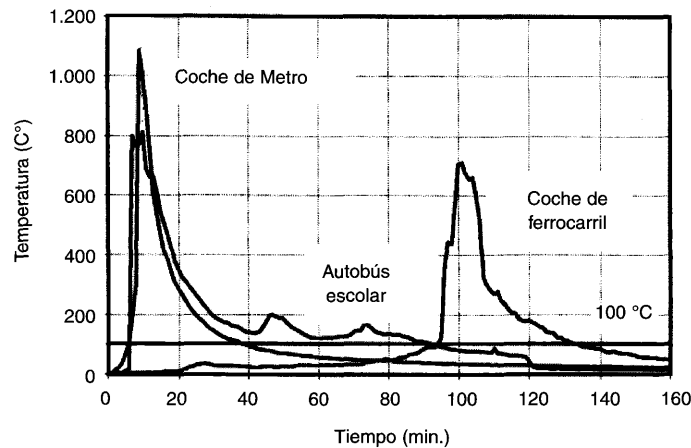


Figura 23.

La subida rápida de la temperatura en el coche de metro y en el autobús es debida a la destrucción del techo de aluminio que actúa como un auténtico fusible y acelera la combustión por llegada y evacuación de aire.

Por contra, es llamativa la lenta subida de temperaturas en el coche ferroviario de acero que además alcanza un pico muy inferior al del coche de aluminio. El tiempo (100 minutos) corresponde al que tardó en propagarse el fuego iniciado en un extremo del coche (con una longitud de 27 m) hasta el otro extremo con una velocidad longitudinal de aire exterior de 0,5 m/s.

Una vez alcanzado ese extremo la evolución es parecida: una subida rápida entre 5 y 10 minutos y una bajada entre 20 y 30 minutos. A 50 m de distancia del foco las temperaturas descendían por debajo de los 100 °C.

Para la visibilidad en el caso del autobús, la Figura 24 muestra la línea de referencia que corresponde a una densidad óptica  $D \approx 0,1 \text{ m}^{-1}$ . Puede verse que a los 10 minutos este nivel ya ha sido superado y permanece así durante todo el experimento debido al bajo tiro natural existente (0,3 m/s).

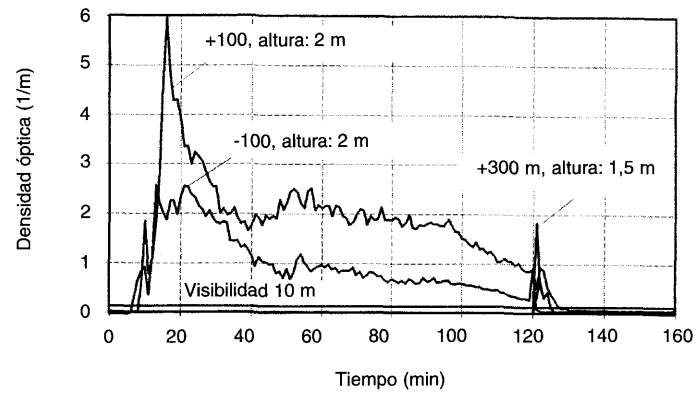


Figura 24.

El pico que se observa a los 120 minutos es debido a la actuación de un ventilador exterior que produjo una corriente de 4 m/s para limpiar el túnel.

La forma de la curva sigue aproximadamente la de la temperatura.

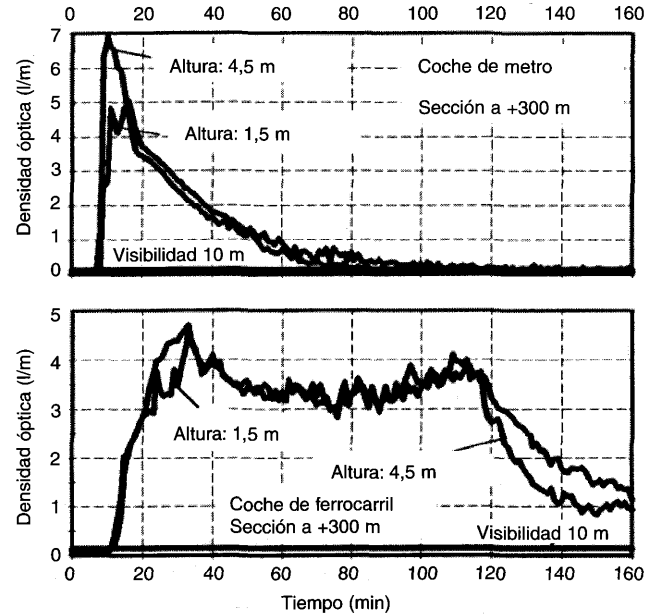


Figura 25.



La Figura 25 recoge la emisión de los vehículos ferroviarios. durante todo el experimento debido al bajo tiro natural existente (0'3 m/s).

La tendencia en la forma para el vehículo de aluminio es semejante a la de temperaturas pero en este caso, a pesar de la baja velocidad existente (0,5 m/s) no parece existir estratificación de los humos ya que las curvas son prácticamente iguales a 1,5 m y a 4,5 m de altura.

En el caso del coche de ferrocarril la emisión de humos se mantiene aproximadamente constante entre los 30 y 110 minutos debido a la progresión del fuego a lo largo del coche.

La emisión de CO se muestra comparativamente en la Figura 26 donde se observa que el límite de 500 ppm es ampliamente superado por el autobús mientras que los vehículos ferroviarios tienen valores inferiores.

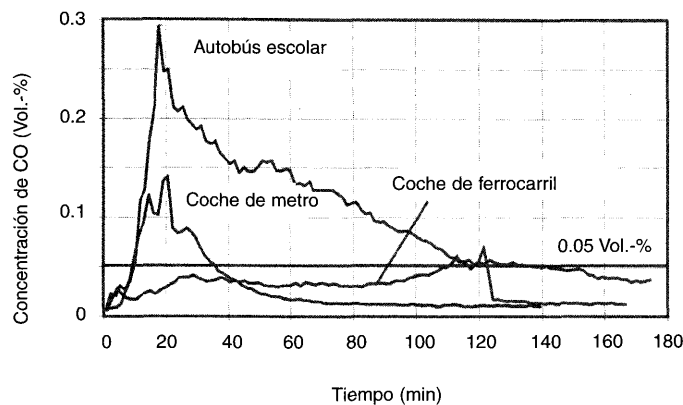


Figura 26.

La bajada brusca que se observa en el caso del autobús es debida a la puesta en marcha del ventilador de limpieza a los 120 minutos.

### 2.5.3. Incendios en túneles en explotación

Los ensayos en condiciones controladas de laboratorio ofrecen resultados con alta fiabilidad. La Figura 27 (referencia 15) representa la determinación de la potencia emitida por automóviles medida en un laboratorio.

Sin embargo, en ocasiones se ha preferido realizar ensayos directamente en túneles previamente a su inauguración o en explotación para comprobar tanto el rendimiento de las instalaciones (ventiladores, caudales circulantes, etc.) como potencias de fuego, temperaturas, opacidad, etc., en situaciones

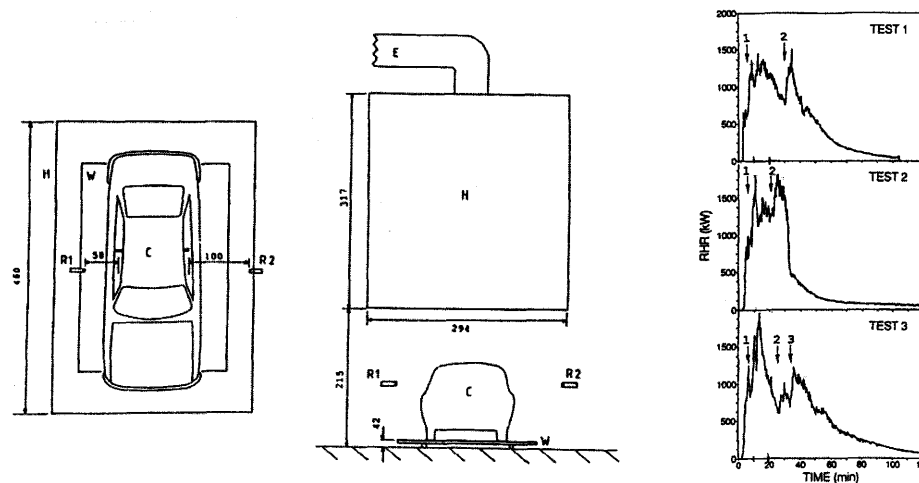


Figura 27.

donde no siempre se tiene el control de las condiciones de tiro natural. En España cabe citar los ensayos llevados a cabo en los túneles de El Padrún (referencia 16) o Lorca. La Figura 28 corresponde a un conocido caso en un túnel de Mónaco.

En ocasiones, el objetivo fundamental de los ensayos es el entrenamiento de los operadores en el centro de control, de los equipos de mantenimiento, de la brigada de incendios y llamar la atención del público usuario sobre la necesidad de estar preparados para este tipo de accidentes. En general, sin embargo, se prefiere realizar ensayos como los indicados en el apartado siguiente.

#### 2.5.4. Ensayos de calibración y puesta a punto

En los últimos años se observa un movimiento en toda Europa tendente a la realización de ensayos con humos fríos y calientes para calibrar el funcionamiento conjunto de las instalaciones de ventilación, detección y control que como medidas de seguridad se colocan en el túnel.

La Figura 29 indica por ejemplo el dispositivo utilizado en los ensayos de humos fríos para el túnel de Frejus (referencia 17).

En este caso se trataba de provocar un caudal de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  durante 20 minutos. Como puede verse se dispusieron baterías de botes de humo que se abrían sucesivamente para mantener el citado caudal correspondiente a un incendio de unos 3 MW. El objetivo del ensayo era calibrar la capacidad de extracción de

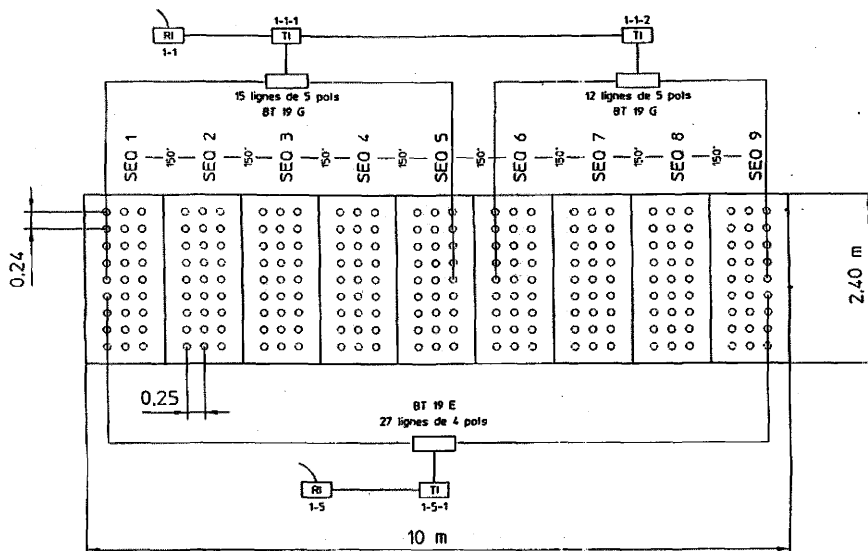


Figura 29b.

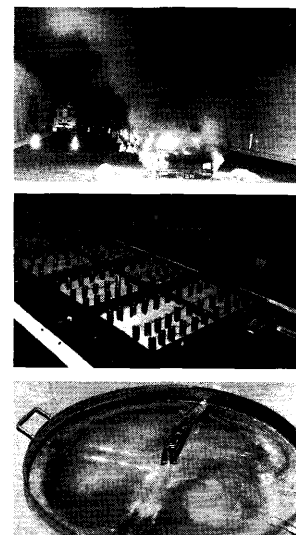
los sistemas de exutorio así como comprobar la efectividad de los símbolos y señales utilizadas para la evacuación de los usuarios en una situación de invasión completa por humos de la sección transversal.

Por el contrario el ensayo con humos calientes tiene por objeto estudiar la estabilidad del estrato que se forma bajo el techo, la efectividad de los exutorios en su evacuación y la corrección de la pauta para controlar la corriente longitudinal.

El esquema utilizado en Frejus fue semejante al indicado en los ensayos de Repparfjord (Figura 22). La Figura 30 muestra la sartén (de aproximadamente 1 m<sup>2</sup> de área) que fue utilizada sobre un lecho aislante de lana de roca (que resultó peor que la capa de arena prevista inicialmente y provocó la ebullición del heptano, su vertido y el descontrol del incendio que tuvo que ser interrumpido) y donde se puede observar el generador de incendio y los termopares de control.

La Figura 31.a recoge la protección del túnel en la zona del foco (20 m a cada lado) mediante un textil de fibra de carbono y la Figura 31.b un árbol de opacímetros situados a diferentes alturas para calibrar el espesor del estrato de humos y su evolución a lo largo del tiempo.

Se trata de ensayos largos y costosos que deben ser previstos en los proyectos.



Figuras 28, 29 y 30.

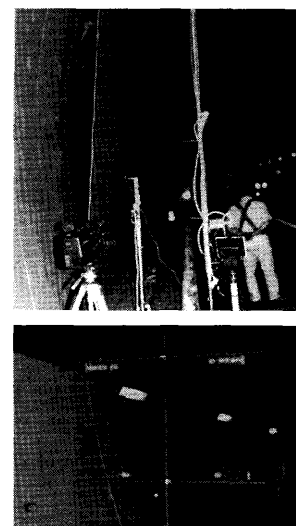


Figura 31.

## 2.6. Sistemas de seguridad en túneles

Con independencia de los temas relacionados con la seguridad estructural en túneles, existe una gama muy amplia de dispositivos que afectan la seguridad del usuario. Puesto que los capítulos siguientes describen en detalle algunas de las que se están llevando a cabo aquí solo se incluyen algunas consideraciones de tipo general (Tabla I).

---

**Tabla I: Algunos dispositivos de seguridad**

---

<b>PASIVOS</b>	<i>Obra civil</i>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Apartaderos y galerías de cambio de sentido</li> <li>- Nichos de seguridad y nichos de incendio</li> <li>- Refugios</li> <li>- Galerías de evacuación</li> <li>- Depósitos y red contraincendios</li> </ul>
	<i>Instalaciones</i>
	<ul style="list-style-type: none"> <li>- BIES</li> <li>- Redes de agua y caces de recogida</li> <li>- Alimentación eléctrica múltiple y equipos de reserva</li> <li>- Iluminación</li> <li>- Señalización con paneles fijos y variables</li> <li>- Semáforos y semibarreras</li> <li>- Redes de comunicación</li> </ul>
<b>INFORMATIVOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Detectores de CO, NOx y opacímetros</li> <li>- Anemómetros</li> <li>- Teléfonos</li> <li>- Cámaras de vídeo y DAI (Detección Automática de Incidentes)</li> <li>- Radio</li> <li>- Localización termométrica</li> </ul>
<b>ACTIVOS</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Ventilación</li> <li>- Exutorios motorizados</li> <li>- Rociadores</li> <li>- Vehículos de evacuación</li> <li>- Vehículos de lucha contra el fuego</li> </ul>
<b>CONTROL</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Plataforma informática</li> <li>- Automatas en túnel</li> </ul>

---

La comercialización de la fibra óptica ha permitido el establecimiento de redes de comunicación muy fiables y los progresos en la velocidad de tratamiento y la capacidad de las computadoras han llevado a la multiplicación de las señales de control y a la posibilidad de su tratamiento armónico para la detección del incendio y la consiguiente selección de una pauta de actuación que se aplica automáticamente si en un intervalo de pocos minutos el operador no ha contestado a las alarmas y propuestas que ha transmitido el sistema. La Figura 32 que corresponde al sistema previsto para el túnel de Somport muestra la riqueza de posibilidades de que se dispone actualmente.

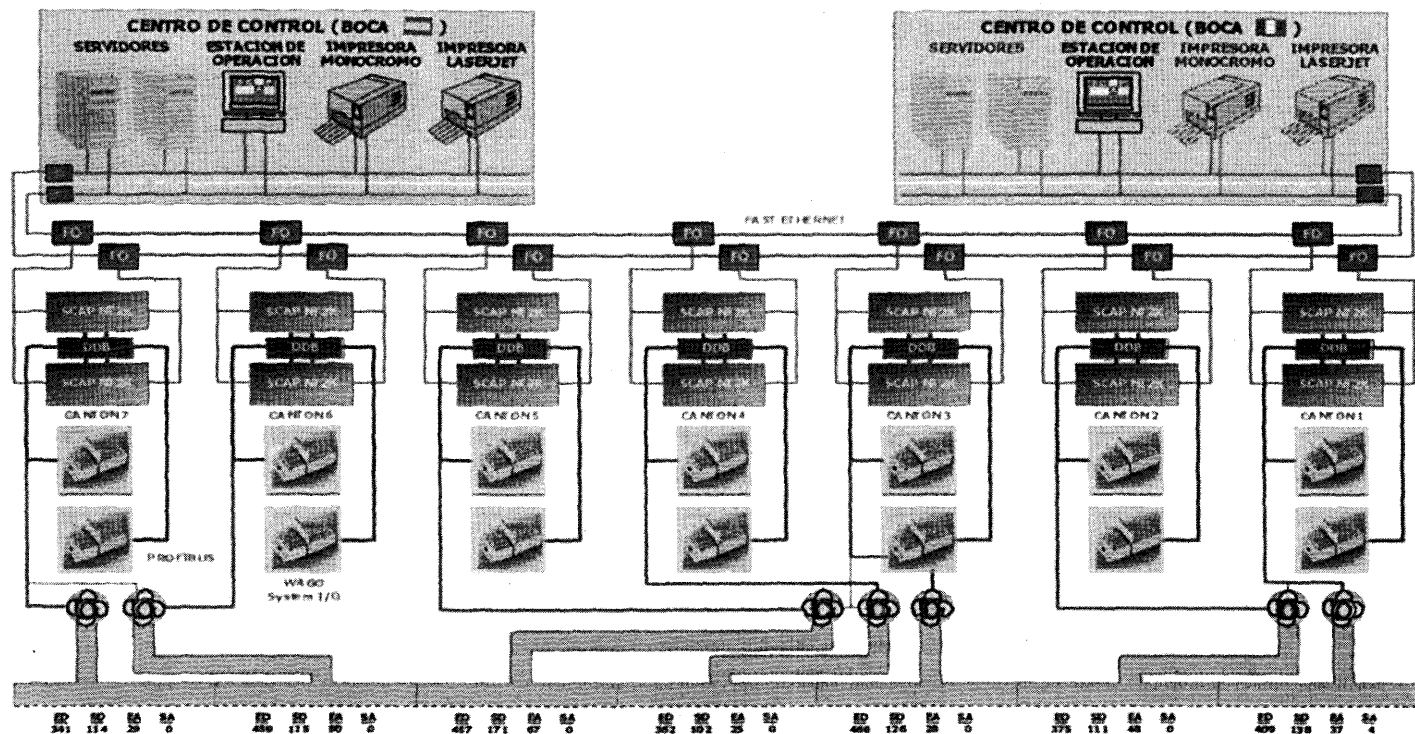


Figura 32.

Es especialmente importante el uso del tratamiento de imágenes para la detección automática de incidentes (DAI) que permite reconocer paradas, adelantamientos, excesos de velocidad, caída de bultos, etc., así como el desarrollo de sistemas de detección térmica de tipo fibroláser para situar el incendio con gran precisión.

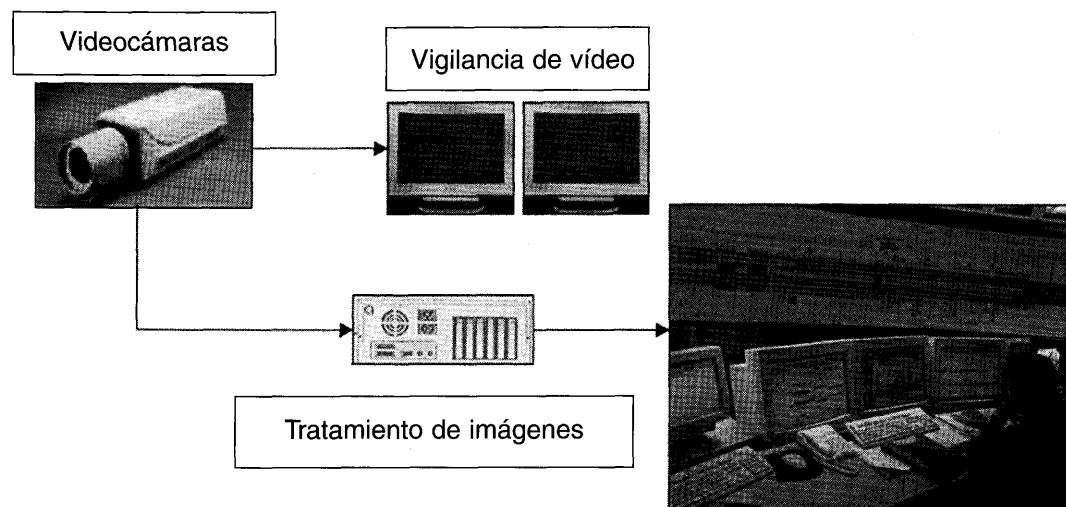


Figura 33.

Con ello se cumple la necesidad de autodefensa y respuesta rápida a la fase inicial tras el accidente cuyo objetivo es el salvamento y evacuación de las personas.

En la segunda fase de extinción del incendio son fundamentales los recursos ajenos de parques de bomberos e incluso instalaciones complementarias que, como los rociadores (contraindicados en la primera fase), contribuyen a reducir las temperaturas en el interior del túnel.

El uso de rociadores ha sido un tema que se ha discutido en varias ocasiones. Es evidente que debido al efecto protector de la carrocería, que actúa como escudo, el agua no sirve para extinguir el incendio dentro del vehículo. Como se ha dicho más arriba podría ser su finalidad la protección de la estructura resistente al túnel y la evitación de la extensión al fuego a vehículos próximos.

Existen algunos túneles con sistemas de rociadores (referencias 18 y 19) y recientemente en España se ha proyectado uno para el túnel de Vielha con la intención de utilizarlo tras la etapa de evacuación. Las objeciones principales contra su uso surgen como resultado de ensayos en túneles reales (vg.: Ofenegg y Memorial) y pueden resumirse como sigue.

---

## Principales objeciones al uso de rociadores

---

### Generación de accidentes:

Por posible puesta en marcha accidental del sistema.

### Dificultades en la etapa de evacuación:

Por extensión de la zona afectada

- La turbulencia y enfriamiento del estrato de humos calientes provoca su bajada reduciendo la visibilidad.
- La expansión del vapor y su incremento de temperaturas empuja los humos en las secciones vecinas a las de actuación de los rociadores.
- El agua puede arrastrar líquidos inflamables más allá de la zona del incendio, extendiendo ésta y aumentando la gravedad de aquél.

Por aumento de peligrosidad sobre las personas.

- El vapor ardiente y el agua caliente generada producen quemaduras a la materia orgánica hasta grandes distancias como pudo verse en los ensayos en el túnel de Offenegg donde se colocaron piezas de carne, madera y pelo colgadas a 1,5 m sobre la solera y a diferentes distancias del fuego.

### Destrozos en las instalaciones

En el túnel

- Tras la extinción de los incendios se ha observado que existen vapores inflamables a lo largo del túnel que al cabo de un cierto tiempo de evaporación (del orden de los 20 minutos) alcanzan la concentración crítica y explotan en contacto con zonas calientes provocando velocidades del aire del orden de 30 m/s, lo que causa daños a las instalaciones de ventilación, señalización, etc.

En el sistema de tuberías de los rociadores

- Cuando el agua fluye en tuberías precalentadas se pueden producir explosiones de vapor de agua que inducen ondas de presión que se trasladan produciendo la rotura de tuberías, cuelgues, etc.
- 

Para evitar esos inconvenientes se están estudiando sistemas mixtos de agua y espuma que reducen los peligros de explosiones así como nuevos sistemas de cortina de aire y boquillas de agua nebulizada (Figura 34).

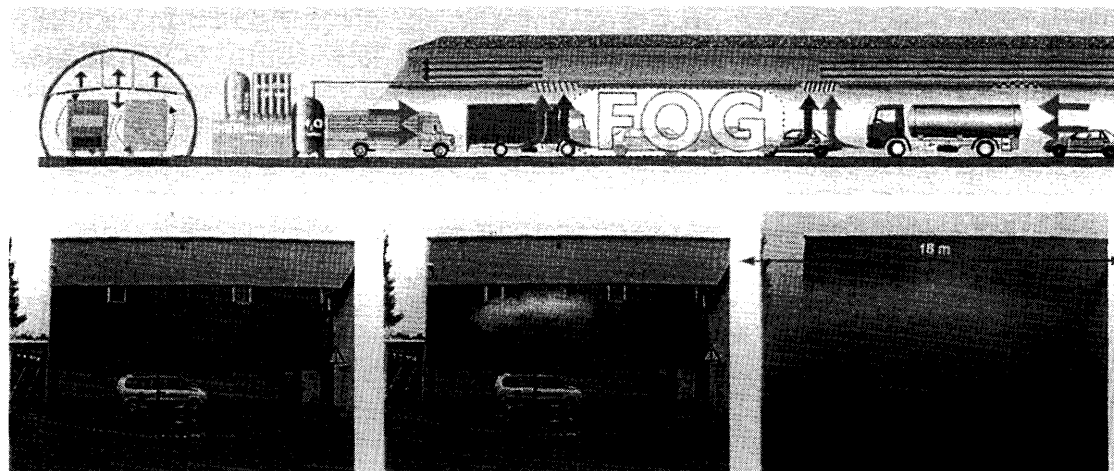


Figura 34. Sistemas de niebla según catálogo comercial.

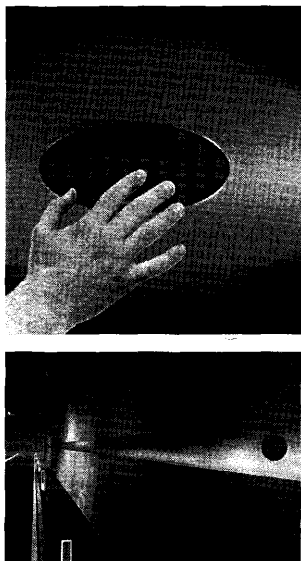


Figura 35.

En el nuevo túnel de Mont Blanc se ha incorporado también un sistema de identificación por color de un "hilo de Ariadna" que conduce al usuario hacia el punto de escape mediante un pasamanos. Este concepto está siendo complementado (Figura 35) en ciertas propuestas recientes donde el contacto manual enciende flechas de orientación y luces que permitan dirigirse en el ambiente de humos hacia la salida de emergencia más próxima.

Además, es fundamental la gestión del accidente especialmente en la armonización de las numerosas instancias que pueden llegar a verse involucradas en la respuesta, algunas de las cuales se citan en la tabla siguiente.

Finalmente cabe indicar que el Comité de expertos UNECE (referencia 20) ha propuesto cuatro vértices (Figura 36) para reflexionar sobre las medidas necesarias para mejorar la seguridad.

De entre las 43 medidas propuestas 10 se refieren a la educación de los usuarios como parte principal en el origen de los accidentes y en el proceso de evacuación, 16 a medidas de explotación de la obra, 11 a mejora de condiciones de las infraestructuras y 6 a controles de equipamiento de los vehículos.

Es especialmente pertinente la referencia a la educación de los usuarios. Un reciente ensayo en Holanda sobre las reacciones de los conductores (ref. 21) ha mostrado que a pesar de observar un camión deliberadamente atravesado en la calzada y emitiendo humo (Figura 37) la mayoría de los conductores permanecían pasivos en el interior de sus vehículos durante más de cinco minutos sin decidirse a abandonarlos.

Las medidas citadas se agrupan en dos bloques que afectan al riesgo: la prevención de accidentes que pueden poner en peligro vidas humanas, el medio ambiente y las instalaciones del túnel, y la



#### SERVICIOS LOCALES DE EMERGENCIA

Bomberos

Ambulancias

Policía

Ejército



#### GRUPOS DE VOLUNTARIOS DE COMUNIDADES PRÓXIMAS



#### GOBIERNO LOCAL

Gabinete de Crisis



Hospitales



Centros de Acogida

Protección Civil

#### ASOCIACIONES PROFESIONALES Y COMERCIALES

Ingenieros



Transporte



Equipos y maquinaria de ayuda



#### MEDIOS DE COMUNICACIÓN PÚBLICOS



#### GOBIERNO CENTRAL

Ministerio de Fomento

Ministerio de Sanidad

Ministerio de Economía

Ministerio de Medio Ambiente



Figura 36.

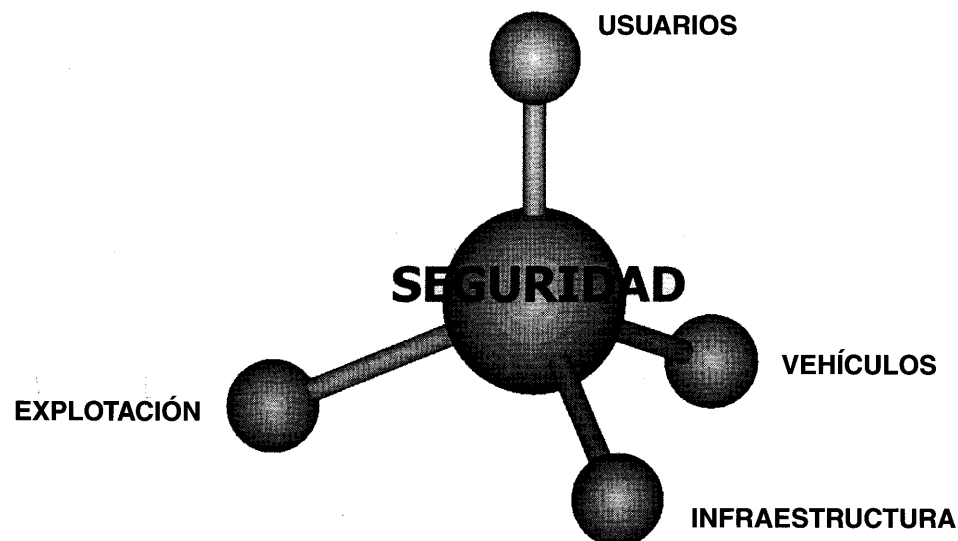


Figura 37.

reducción de las consecuencias mediante la autoprotección de los usuarios, la intervención rápida de los servicios de ayuda y del resto de los conductores, etc.

Puesto que en la Unión Europea el transporte por carretera representa el 85% en mercancías y el 93% en pasajeros de todo el transporte terrestre se comprende que se está ante un tema de la mayor trascendencia no solo social y política, sino también económica: se estima, por ejemplo, que las pérdidas (tanto por reparación como por pérdida de ingresos) producidas en el incendio de Mont Blanc superan los 100.000 millones de pesetas.

## Referencias

1. E. Alarcón: "La seguridad de las infraestructuras. El caso de los incendios en túneles". Lección inaugural de curso. Academia de Ingeniería. Madrid (2002).
2. A. J. M. Heselden: "Studies of fire and smoke behaviour relevant to tunnels". 2nd International Symposium on the Aerodynamics and Ventilation of vehicle tunnels. BHRA (1976).

3. B. J. McCaffrey: "Purely buoyant diffusion flames: some experimental results". Nat. Bur. Standards NBSIR79-1910 (1979).
4. C. L. Beyler: "Fire plumes and ceiling jets". *Fire Safety Journal* 11, 53-75. (1986).
5. G. Heskestad: "Luminous heights of turbulent diffusion flames". *Fire Safety Journal* 5, 103-108. (1983).
6. P. H. Thomas, P. L. Hinkley y otros: "Investigations into the flow of hot gases in roof venting". *Joint Fire Res. Org. Paper n° 7 HMSO* (1963).
7. G. Heskestad: "Fire plume entrainment according to two competing assumptions" 21st Sump. on Combustion. Combust. Inst. Pittsburgh (1986).
8. R. L. Alpert: "Calculation of response time of ceiling-mounted fire detectors". *Fire technology* 8, 181-195 (1972).
9. D. J. Rasbash: "Smoke and toxic products produced at fires". *Transactions and Journal of the Plastic Institute Conference Supplement n° 2*, pp 55-62. (1967).
10. E. G. Butcher y A. A. Parnell: "Smoke Control in fire safety design" *E & F. N. Spon* (1979).
11. P. Chassé y D. Lacroix: "Étude sur maquettes aérauliques des systemes de trapées de desengumage en tunel routier". CETU (1994).
12. A. Koseki y T. Yamamoto: "Air entrainment and Thermal radiation from heptane pool fires". *Fire Technology* (1988).
13. Bechtel, Passon Brinckerhoff: "Memorial Tunnel Fire ventilation test program. Test report". Mass. High. Dept. (1995).
14. Swedish National Testing and Research Institute: "Proceedings of the international conference on fires in tunnels". SP (1994).
15. J. Mangs & O. Keski-Rahkonen: "Characterizacion of the fire behaviour of a burning passenger car. Part I: Car fire experiments" *Fire safety Journal*. Vol 23, 17-35 (1994).
16. F. Hacar, A. Abella, I. G<sup>a</sup> Arango: *Incendios en túneles*. Ed. Paraiso (1993).
17. Tunnel Routier du Frejus: Essais Globaux Site. SETEC. (1996).
18. R. A. Josephson y P. R. Shafer: "Foam systems for highway tunnels". *Industrial fire safety* 1. 43. (1992).
19. R. Foster: *Fire protection in Sydney Harbour Tunnel*. FIRE (1993).
20. UNECE: *Recommendations of the group of experts on safety in road tunnel*. Economic & Social Council for Europe United Nations. (Dic. 2001).
21. L. C. Boer: *Finding your way out*. Transport Matters. TNO marzo 2002.